Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 17, No. 4, 2026, p. 629-643

The Effects of Inoculation Levels with Biofertilizer, Chemical Fertilizer, and Cytokinin Foliar Application on Yield and Yield Components of Pishgam Wheat (*Triticum aestivum* L.)

Esmail Nabizadeh[1*] and Khadijeh Ahmadi[2]

1- Department of Agrotechnology Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran
2- Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran
(*- Corresponding author's Email: e.nabizadeh@iau.ac.ir)

Dates	How to cite this article:
Received: 30-10-2025 Revised: 05-01-2026 Accepted: 14-01-2026 Available Online: 10-05-2026	Nabizadeh, E., & Ahmadi, K. (2026). The effects of inoculation levels with biofertilizer, chemical fertilizer, and cytokinin foliar application on yield and yield components of Pishgam wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agroecology, 17*(4), 629-643. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a strategic global crop, vital for food security, providing approximately 20-25% of the world's caloric intake and a significant share of dietary protein. With the global population projected to reach 9.6 billion by 2050, the implementation of sustainable agricultural practices has become imperative to meet escalating food demands without exacerbating environmental degradation. Traditional farming, heavily reliant on chemical fertilizers and pesticides, has led to soil and water pollution, threatening ecosystem health and human safety. In this context, soil microorganisms, particularly arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), play a pivotal role in sustainable production by enhancing nutrient cycling and improving the bioavailability of essential elements such as nitrogen and phosphorus. Nitrogen is a major yield-limiting factor in wheat production, with peak demand during tillering, heading, and grain filling stages. However, conventional nitrogen sources like urea are prone to leaching in light soils, contaminating groundwater. Bio-fertilizers and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) offer a sustainable and eco-friendly alternative to chemical fertilizers, improving both targeted plant nutrition and soil physicochemical properties. Furthermore, plant hormones, such as cytokinins, act as chemical messengers and are crucial in mediating plant responses to environmental stresses. Cytokinins regulate key processes, including cell division, chlorophyll synthesis, delay of senescence, and ultimately, yield enhancement. The Pishgam wheat cultivar, developed for cultivation under normal and limited irrigation in Iran's cold climates, has shown promising performance. However, limited information exists on its response to co-application of mycorrhizal fungi and cytokinin hormones. Therefore, this study was conducted to investigate the effects of different inoculation levels of mycorrhizal fungi, urea fertilizer, and cytokinin foliar application on the yield and yield components of irrigated Pishgam wheat.

https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258

Materials and Methods

The experiment was carried out during the 2022-2023 cropping season at the research farm of Islamic Azad University, Mahabad Branch, West Azerbaijan, Iran. The study was arranged as a factorial experiment based on a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The experimental factors included: first, mycorrhizal organic fertilizer (containing mycorrhizal fungi) at three levels (2, 4, and 6 kg per 100 kg of seed); second, urea fertilizer from a urea source at three levels (0, 50, and 100 kg per hectare); and third, cytokinin foliar application (6-benzylaminopurine) at three stages (no application, application at flowering stage—Zadoks code 55, and application at the beginning of grain filling stage). The Pishgam cultivar seeds were disinfected with 70% ethanol and sodium hypochlorite, then inoculated according to the treatment groups. Soil analysis indicated a loamy clay texture, a neutral to weak alkaline pH, negligible urea, and sufficient levels of phosphorus and potassium. Seeds were planted at a depth of 4 cm with a density of 180 $kg.ha^{-1}$. Urea fertilizer was applied in two splits: one-third at planting and the remaining two-thirds at the beginning of stem elongation and before flowering. A 3 mM cytokinin solution was prepared and applied at a rate of 1.5 liters per plot using a hand sprayer, with Tween 20 added as a surfactant. Standard weed, pest, and disease management practices were uniformly applied. At physiological maturity, plants from a one-square-meter area per plot were harvested. Measured traits included plant height, flag leaf length, spike length, number of fertile spikes per square meter, number of grains per spike, thousand-kernel weight, biological yield, grain yield, and harvest index. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software (version 9.4), and mean comparisons were performed using Duncan's Multiple Range Test at a 5% probability level.

Results and Discussion

The analysis of variance revealed that the interaction effects between the factors were highly significant. The interaction between mycorrhizal fungi and urea fertilizer significantly influenced flag leaf length, spike length, number of spikes per square meter, and biological yield. Similarly, the interaction between mycorrhizal fungi and cytokinin application had a significant effect on plant height, flag leaf length, grain yield, and harvest index. Furthermore, the interaction between urea fertilizer and cytokinin application timing significantly affected spike length, number of spikes per square meter, thousand-kernel weight, grain yield, and harvest index. The highest grain yield (approximately 12 $tons.ha^{-1}$) was achieved with the combined application of 4 $kg.ha^{-1}$ mycorrhiza, 50 $kg.ha^{-1}$ urea, and cytokinin spraying at the flowering stage. This combination outperformed the control and other treatments, highlighting a strong synergistic effect. The results demonstrated that mycorrhizal inoculation, particularly at 4 $kg.ha^{-1}$, significantly enhanced nutrient uptake, especially phosphorus, leading to improved photosynthetic capacity and longer flag leaf duration. Cytokinin application, especially at the flowering and grain filling stages, effectively delayed senescence, increased the number of fertile tillers, and improved grain filling efficiency. The combination of these treatments allowed for a substantial reduction in urea fertilizer input by 50% (from 100 to 50 $kg.ha^{-1}$) without any compromise in yield, underscoring the role of bio-fertilizers and growth regulators in enhancing nutrient use efficiency. The improvement in yield components, including spike length, number of spikes per unit area, and thousand-kernel weight, was directly linked to better resource allocation and reduced oxidative stress under the integrated management approach.

Conclusion

The findings of this research conclusively show that the integrated application of mycorrhizal fungi (at an optimal rate of 4 $kg.ha^{-1}$), reduced urea fertilizer (50 $kg.ha^{-1}$), and cytokinin foliar spraying at critical reproductive stages (flowering and early grain filling) can significantly enhance the yield and yield components of Pishgam wheat. This management strategy works through multiple mechanisms: improved nutrient and water uptake via expanded root systems mediated by mycorrhizae, enhanced photosynthetic activity and delayed leaf senescence induced by cytokinins, and more efficient allocation of photo-assimilates to the grains. The study successfully demonstrates that it is possible to replace a significant portion of chemical urea fertilizer with organic amendments and growth regulators, thereby promoting a more sustainable and environmentally friendly wheat production system without sacrificing productivity. For achieving high and stable yields in wheat cultivation under similar agro-climatic conditions, it is highly recommended to adopt this integrated approach using 4 $kg.ha^{-1}$ mycorrhizal seed inoculation, 50 kg/ha urea application, and cytokinin foliar spray at the flowering stage.

Acknowledgement

The authors of this article feel it necessary to sincerely express their gratitude for the cooperation and support

of the officials of the Faculty of Agriculture and the laboratory experts at Islamic Azad University, Mahabad Branch, who extended their utmost assistance during various stages of this research.

Keywords: Urea, Harvest index, Flag leaf length, Mycorrhiza, Thousand-grain weight.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۷، شماره ٤، زمستان ۱٤۰٤، ص ٦٤٣-٦۲۹

تأثیر سطوح تلقیح با کود زیستی، شیمیایی و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیشگام

اسمعیل نبی‌زاده[1]* و خدیجه احمدی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

چکیده

برای بررسی تأثیر سطوح مختلف کود زیستی مایکوریزا، کود اوره و تنظیم‌کننده رشد سایتوکینین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) آبی رقم پیشگام، آزمایشی طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل اول کود زیستی مایکوریزا (۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم بذر)، عامل دوم کود اوره صفر (شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و عامل سوم محلول‌پاشی با سایتوکینین (بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه) بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل قارچ مایکوریزا و مصرف کود اوره سبب افزایش معنی‌دار طول برگ پرچم، طول سنبله، تعداد سنبله در مترمربع و عملکرد بیولوژیک شد، به‌طوری‌که تیمارهای برتر در مقایسه با شاهد، این صفات را به‌ترتیب تا حدود ۱۹، ۲۱، ۴۰ و ۱۴ درصد افزایش دادند. اثر متقابل قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین نیز موجب بهبود ارتفاع بوته، طول برگ پرچم، عملکرد دانه و شاخص برداشت گردید، به‌نحوی‌که بیشترین عملکرد دانه در این برهم‌کنش، افزایشی در حدود ۳۳ درصد نسبت به شاهد نشان داد. همچنین برهم‌کنش کود اوره و زمان محلول‌پاشی با سایتوکینین باعث افزایش طول سنبله، تعداد سنبله در مترمربع، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت شد. وزن هزار دانه و عملکرد دانه به‌ترتیب حدود ۱۰ و بیش از ۲۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. کاربرد توأم قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین توانست با حفظ عملکرد دانه و اجزای آن، مصرف کود اوره را تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۵۰ درصد) در زراعت گندم رقم پیشگام کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: اوره، شاخص برداشت، طول برگ پرچم، مایکوریزا، وزن هزار دانه

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.)، یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی و غذایی جهان است که به هر دو روش آبی و دیم کشت می‌شود. این محصول راهبردی حدود ۲۰-۶ درصد پروتئین و ۲۵ درصد کالری مورد نیاز بدن انسان را تأمین می‌کند (FAO, 2020). در استان آذربایجان غربی، سطح زیرکشت گندم آبی بیش از ۹۰ هزار هکتار با میانگین عملکرد ۳/۸ تن در هکتار ثبت شده است (Anonymous, 2019). اجرای کشاورزی پایدار برای پاسخگویی به نیازهای غذایی جمعیت روبه‌رشد جهان که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد نفر برسد، اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا کشاورزی سنتی توان پاسخگویی پایدار به این نیاز را ندارد (Alori et al., 2017; Akhtar, 2019). استفاده گسترده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها ضمن افزایش بازدهی منجر به آلودگی محیط‌زیست و تهدید سلامت انسان می‌شود (Alori et al., 2017; Akhtar,

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران
۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: e.nabizadeh@iau.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96255.1258

2019). در این میان، ریزجانداران خاک با ایفای نقش کلیدی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی عناصر و افزایش قابلیت دسترسی نیتروژن و فسفر، نقش مهمی در تولید پایدار ایفا می‌کنند (Alori et al., 2017).

نیتروژن به‌عنوان یکی از محدودکننده‌ترین عناصر غذایی در تولید اقتصادی گندم شناخته می‌شود و بیشترین نیاز به آن در مراحل پنجه‌زنی، ظهور سنبله و تشکیل دانه است (Farooq et al., 2019). نیتروژن، متداول‌ترین کود نیتروژنی است؛ امّا به‌دلیل حلالیت بالا در خاک‌های سبک به‌راحتی شسته شده و موجب آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از کودهای زیستی یا باکتری‌های محرک رشد گیاه، جایگزینی پایدار و ایمن برای کودهای شیمیایی محسوب می‌شود. این کودها علاوه‌بر تغذیه هدفمند گیاه، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک را بهبود می‌دهند (Vejan et al., 2016). همچنین گزارش‌ها نشان داده‌اند که تلقیح بذر با قارچ‌های همزیست مانند مایکوریزا می‌تواند تحمل به تنش شوری و خشکی و جذب عناصر غذایی ازجمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم را بهبود بخشد (Fahramand et al., 2014).

تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نیز به‌عنوان پیام‌رسان‌های شیمیایی، نقش مهمی در تحمل گیاه به تنش‌های محیطی دارند. از میان آن‌ها، سایتوکینین‌ها در فرآیندهای مهمی مانند تقسیم سلولی، افزایش شاخه‌های جانبی، سنتز کلروفیل، تأخیر در پیری و بهبود عملکرد نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Ha et al., 2012). تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پنجه‌زنی می‌تواند تعداد دانه در سنبله، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و میزان پروتئین دانه گندم را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Alzaayid & Aloush, 2021). همچنین کاربرد سایتوکینین در مزارع برنج (*Oryza sativa*) منجر به بیش از ۲۰ درصد افزایش عملکرد دانه شده است (Yeh et al., 2015). رقم پیشگام از تلاقی ارقام Zhong 87-90 و برکت به دست آمده و متوسط عملکرد آن در شرایط نرمال ۷/۵۲ تن در هکتار و در شرایط تنش ۵/۱۴ تن در هکتار گزارش شده است (Mahfouzi et al., 2009).

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار ممکن است راندمان جذب نیتروژن گیاه را بهبود ببخشد که می‌تواند با تنظیم روابط منبع–مخزن توسط سیتوکینین تعامل داشته باشد تا تخصیص کربوهیدرات به دانه‌های در حال رشد را بهینه کند. در نتیجه، فرض بر این است که وجود نیتروژن کافی، همراه با جذب مواد مغذی القاشده توسط قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و تقسیم‌بندی مواد فتوسنتزی تنظیم‌شده توسط سیتوکینین، باعث افزایش هم‌افزایی عملکرد گندم و شاخص برداشت می‌شود و از اثرات مشاهده‌شده هنگام اعمال هر عامل به‌صورت جداگانه فراتر می‌رود. اگرچه مطالعات قبلی برهم‌کنش‌های قارچ‌های میکوریز آربوسکولار× نیتروژن یا قارچ‌های میکوریز آربوسکولار× سیتوکینین را بررسی کرده‌اند (Cosme & Wurst, 2013)، امّا تأثیر ترکیبی هر سه عامل بر عملکرد گندم در شرایط آبیاری تا حد زیادی ناشناخته مانده است. با وجود گزارش‌های متعدد درباره نقش مثبت قارچ‌های مایکوریزا در بهبود جذب عناصر غذایی و اثرات تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند سایتوکینین بر فرآیندهای فیزیولوژیک و عملکرد گندم، اغلب مطالعات، این عوامل را به‌صورت جداگانه یا در شرایط تنش بررسی کرده‌اند و اطلاعات کافی درباره اثرات تعاملی مایکوریزا، کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های تخصیص ماده در شرایط آبیاری کامل و در ارقام رایج گندم ایران از جمله رقم پیشگام، محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات سطوح مختلف قارچ مایکوریزا، کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص برداشت گندم رقم پیشگام در شرایط آبیاری کامل اجرا شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات آزمایش

این آزمایش در اواخر شهریورماه ۱۴۰۱، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد در ۱۵ کیلومتری مهاباد (آذربایجان غربی) اجرا گردید. این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد، عامل اول شامل سه سطح کود زیستی مایکوروت که حاوی قارچ مایکوریزا است (۲ و ۴ و ۶ کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم بذر)؛ و عامل دوم سه سطح کود شامل (صفر (به‌عنوان شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار) و عامل سوم محلول‌پاشی سایتوکینین شامل بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی در مرحله گل‌دهی زمانی‌که ۵۰ درصد گل‌ها از غلاف بیرون آمده بود. محلول‌پاشی در مرحله شروع پر شدن دانه بود. رقم گندم مورد آزمایش پیشگام بود که از مؤسسه دیم کشور در مراغه دریافت شد. کود زیستی مایکوروت زراعی از شرکت زیست‌فناور پیشتاز واریان تهیه شد.

آماده‌سازی خاک و کاشت بذرها

نتایج آزمایش خاک مزرعه در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از کاشت، بذور ضدعفونی شده و براساس نوع تیمار، بر اساس دستورالعمل کود زیستی مایکوروت (حاوی قارچ‌های مایکوریزای آرباسکولار و به‌صورت پودری تجاری‌شده)، بذرهای گندم برای بذرمال در سایه روی نایلون تمیز پخش شدند. سپس با مقدار کمی آب مرطوب شده و کود مایکوریز به آن‌ها افزوده شد و به‌طور کامل مخلوط گردید، به‌گونه‌ای که تمامی بذرها با لایه‌ای یکنواخت از مایه تلقیح پوشانده شوند. طبق دستورالعمل، صرفاً مرطوب شدن بذرها کفایت داشت و از خیس یا چسبنده شدن آن‌ها جلوگیری شد. پس از هواخشک شدن بذرها در سایه، عملیات کشت انجام گرفت. این کود زیستی حاوی میسیلیوم‌های قارچ مایکوریزا بود. عمق کشت بذر چهار سانتی‌متر و میزان بذر مصرفی براساس تراکم ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار مطابق منطقه در نظر گرفته شد که براساس وزن هزار دانه و سطح واحدهای آزمایشی محاسبه و توزین شد. هر تیمار در پنج ردیف با فاصله ۱۵ سانتی‌متر و با طول هر ردیف پنج متر کشت شد. فاصله بین کرت‌های آزمایشی نیز دو متر در نظر گرفته شد. پس از کاشت، بلافاصله آبیاری به‌روش آبیاری بارانی صورت گرفت و پس از سبز شدن یکنواخت مزرعه، در هر سطح نیتروژن، یک‌سوم کود شیمیایی از نوع اوره در زمان تهیه زمین و دو سوم دیگر به‌صورت سرک و به‌طور مساوی در ابتدای مرحله ساقه رفتن و قبل از گل‌دهی به خاک داده شد.

ابتدا محلول سه میلی‌مولار سایتوکینین از منبع ماده ۶- بنزیل آمینوپورین تهیه و به‌روش محلول‌پاشی و با استفاده از سم‌پاش دستی به‌مقدار ۱/۵ لیتر محلول برای هر کرت آزمایشی در مرحله گل‌دهی زمانی‌که ۵۰ درصد گل‌ها از غلاف بیرون آمدند (کد۵۰ زادوکس) اعمال شد. غلظت سه میلی‌مولار براساس آزمون‌های مقدماتی و بدون بروز علائم سمیت انتخاب گردید (Nabizadeh, 2023). جهت سهولت جذب محلول سایتوکنین، به همراه آن از یک مایع مویان به نام توئین[1] به‌مقدار ۰/۱ درصد استفاده شد. در فاصله زمانی بین کاشت تا برداشت، مراقبت‌های لازم برای تمام کرت‌های آزمایشی شامل مبارزه با علف‌های هرز برای همه تیمارها یکسان به‌صورت دستی و شیمیایی با علف‌کش گرانستار ۱۵گرم در هکتار (مرحله پنجه زنی تا ساقه رفتن) انجام شد. مجموع بارندگی در سال زراعی اجرای آزمایش ۳۵۲/۳ میلی‌متر بود و بیشترین مقدار بارش در فروردین انجام گرفت (جدول ۲). در طی دوران رشد گیاه، آبیاری براساس اقلیم و بافت خاک طبق نیاز گیاه در مراحل رشد انجام گرفت.

صفات نمونه‌برداری‌شده

در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، گیاهان مربوط به هر کرت برداشت شد (سطح برداشت یک مترمربع از خطوط وسط کرت بود). در آزمایشگاه با توزین گیاهان برداشت‌شده، ماده خشک کل به دست آمد. برای تعیین عملکرد دانه، سنبله‌ها جداسازی و کوبیده شده و وزن دانه‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان عملکرد دانه (با رطوبت ۱۴ درصد) در نظر گرفته شد. عملکرد، تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، زیست‌توده، عملکرد بیولوژیک و نیز شاخص برداشت برمبنای سطح برداشتی و اجزای عملکرد بر مبنای متوسط سنبله ۱۰ بوته مورد محاسبه قرار گرفتند.

تجزیه‌های آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها، آزمون نرمال بودن مقادیر انجام و سپس تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت. مقایسه میانگین صفات با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

طول برگ پرچم

برگ پرچم به‌عنوان آخرین برگ فعال در گیاهان غلات، نقش کلیدی در تأمین فتوآسیمیلات مورد نیاز دانه‌ها از طریق فتوسنتز ایفا می‌کند. طول و سلامت این برگ به‌طور مستقیم بر عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تلقیح بذر با قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی و سطوح کود اوره در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل تلقیح با مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد بر طول برگ پرچم معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس مقایسه میانگین‌ها، تیمار ترکیبی تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار بیشترین طول برگ پرچم را (۱۲/۱ سانتی‌متر) داشت (جدول ۴). این بهبود احتمالاً ناشی از هم‌افزایی بین جذب بهتر عناصر غذایی

1- Tween 20

به‌ویژه فسفر و اوره توسط شبکه قارچی و تأمین کافی نیتروژن بـرای توسـعه سـاختارهای فتوسـنتزی اسـت (Zhou et al., 2024). در بـرهم‌کنش مـایکوریزا و سـایتوکینین، بیشـترین طـول بـرگ پـرچم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ و ۶ کیلوگرم مایکوریزا در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحلـه شـروع دانـه بسـتن (۲۱/۷ و ۲۱/۳ سانتی‌متـر) بـود. در مقابـل، کمتـرین طـول بـرگ در تیمـار ۲ کیلوگرم مایکوریزا بدون محلول‌پاشی (۱۸/۸ سانتی‌متر) و ۶ کیلـوگرم مایکوریزا با محلول‌پاشی در مرحله پر شـدن دانـه (۱۸/۷ سـانتی‌متـر) مشاهده شد (جدول ۵). این یافته‌ها نشان می‌دهد کـه زمـان مصـرف سایتوکینین عاملی تعیین‌کننده در حفظ سـبزینه‌ای و گسـترش بـرگ پرچم است. تلقیح بـا قارچ‌هـای مـایکوریزایی در شـرایط مختلـف، از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، رشد رویشی و طول عمر برگ پرچم را تقویت می‌کند (Han et al., 2025).

جدول ۱- نتایج آزمون خاک

Table 1- Soil test result

بافت Texture	عمق depth (cm)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	پتاسیم قابل جذب K (mg.kg^{-1})	فسفر قابل جذب P (mg.kg^{-1})	نیتروژن کل N (%)	کربن آلی Organic C (%)	کلسیم کربنات Calcium carbonate (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m^{-1})	درصد اشباع Saturation percentage (%)
لومی Loam	0-30	24	42	34	255	8.05	0.13	0.08	8	8	2.14	38

جدول ۲- آمار هواشناسی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ مهاباد

Table 2- Agro-meteorological Statistics for agricultural year 2022–2023 (Mahabad)

ماه Month	دما Temperature (°C)			بارندگی Precipitation (mm)	رطوبت نسبی Relative humidity (%)		
	میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min		میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min
مهر September	17.2	32.6	1.8	15.7	55.5	93	19
آبان November	13.6	27.8	-0.6	2.8	54	95	13
آذر December	3.5	16.4	-9.4	44.4	57.5	100	15
دی December	-1.1	10.8	-13	56.4	58.5	97	20
بهمن February	-1.1	10.5	-13	64.9	58	99	17
اسفند March	5.7	19	-7.6	32.4	52.5	90	15
فروردین April	8.7	19.4	-2	106.1	57.5	97	18
اردیبهشت May	19	33.6	4.4	28.6	57	95	19
خرداد June	17	31.8	2.2	0	53.5	94	13
تیر July	25.5	39	12	1	43.5	81	6

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی گندم تحت تأثیر مایکوریزا، اوره و سایتوکینین

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) for studied traits of wheat under the effects of mycorrhiza, urea, and cytokinin

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	طول برگ پرچم Flag leaf length	طول سنبله Spike length	تعداد سنبله Number of spikes	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	وزن هزار دانه Thousand-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index
تکرار Repetition	2	0.72^{ns}	2.96^{ns}	4016.62^{ns}	154.29^{ns}	15.71^{ns}	4669^{ns}	22462^{ns}	0.0002^{ns}
مایکوریزا Mycorrhiza (M)	2	12.86**	1.02**	28569.5**	58.27*	37.38**	374169**	280958**	0.097**
اوره Urea (U)	2	33.18**	2.94**	5411.7^{ns}	71.62*	6.27^{ns}	265614**	505844**	0.007^{ns}
سایتوکینین Cytokinin (C)	2	12.08**	0.50^{ns}	8230.42^{ns}	218.52**	1.56^{ns}	31690*	840806**	0.013**
M × U	4	27.88**	0.47*	21179.2**	9.91ns	4.93ns	14688ns	75939**	0.007ns
M × C	4	8.75*	0.75**	4616.6^{ns}	5.99^{ns}	3.51^{ns}	36963**	58615^{ns}	0.18**
U × C	4	2.38^{ns}	0.59*	15199.8*	19.99^{ns}	12.34**	33117**	46963^{ns}	0.16**
M × C × U	8	4.09^{ns}	0.16^{ns}	6408.3^{ns}	10.19^{ns}	4.40^{ns}	6578^{ns}	80834^{ns}	0.005^{ns}
خطا Error	52	2.84	0.20	6290.3	20.20	3.2	9321	32043	0.003
ضریب تغییرات CV (%)	-	8.50	5.64	14.89	8.46	13.63	9.16	7.66	12.16

**: معنی‌دار در سطح یک درصد، *: معنی‌دار در سطح پنج درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار.

**: Significant at the 1% level; *: Significant at the 5% level; ^{ns}: not significant.

طول سنبله

طول سنبله به‌عنوان یکی از صفات ساختاری مهم در گندم، ارتباط مستقیمی با تعداد سنبلچه‌ها و در نتیجه پتانسیل تشکیل دانه دارد. نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از این آزمایش نشان داد که اثر ساده مایکوریزا، اوره و اثر متقابل ماکوریزا در سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. اثر متقابل مایکوریزا × اوره و اوره × سایتوکینین در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار همراه با ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌ترتیب با میانگین ۸/۶ و ۸/۶ سانتی‌متر بیشترین طول سنبله را داشتند. در مقابل، تیمارهای تلقیح با ۴ و ۶ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون مصرف کود اوره (شاهد) کمترین طول سنبله را نشان دادند (جدول ۴). این یافته‌ها بیانگر نقش مکمل قارچ مایکوریزا و اوره در توسعه ساختارهای زایشی گیاه است. در برهم‌کنش قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین ، بیشترین طول سنبله (۸/۷ سانتی‌متر) در تیمار تلقیح با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه مشاهده شد. کمترین طول سنبله نیز در تیمار تلقیح با ۲ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین ثبت گردید (جدول ۵). برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه بیشترین طول سنبله (۸/۷ سانتی‌متر) را ایجاد کرد (جدول ۶). این نتایج می‌تواند ناشی از اثر سایتوکینین در تحریک تقسیم سلولی و رشد ساقه زایشی باشد. مطالعات اخیر نیز گزارش کرده‌اند که کاربرد توأم کودهای بیولوژیک و سایتوکینین در مراحل حساس زایشی گندم، از طریق بهبود وضعیت غذایی و تنظیم فیزیولوژی رشد، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Kopma et al., 2021). همچنین تلقیح بذر با قارچ‌های مایکوریزایی در ترکیب با نیتروژن بهینه، با بهبود توازن تنظیم‌کننده رشد و کاهش تنش اکسیداتیو، رشد ساقه زایشی را تقویت می‌کند (Tang et al., 2022).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر ترکیبات تیماری سطوح قارچ مایکوروت و کود اوره بر صفات مورد بررسی گندم

Table 4- Mean comparison of mycorrhizal fungus and urea fertilizer treatment combinations for the studied traits of wheat

قارچ مایکوریزا Mycorrhiza fungi (kg.100 (kg^{-1} of seeds	کود اوره Urea (kg.ha^{-1})	طول برگ پرچم Flag leaf length (cm)	طول سنبله Spike length (cm)	تعداد سنبله Number of spikes (spikes.m^{-2})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (g.m^{-2})
2	0	18.66^{c*}	7.77^{cd}	464.44^{c}	2092.1e
	50	19.05^{bc}	8.05^{bcd}	504.78^{bc}	2197.1^{de}
	100	19.78^{bc}	7.19^{cd}	544.56^{ab}	2464.6^{ab}
4	0	18.50^{c}	7.66^{d}	557.11^{ab}	2220de
	50	19.07^{bc}	8.61^{a}	566.89^{a}	2302.3^{bcd}
	100	22.06^{a}	8.62^{a}	550.67^{ab}	2398.9^{abc}
6	0	20.28^{b}	7.74^{d}	462.22^{c}	2260.3^{cde}
	50	19.58^{bc}	8.20^{abc}	543.56^{ab}	2562.1^{a}
	100	19.48^{bc}	8.38^{ab}	568.22^{ab}	2524.9^{a}

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level ($p < 0.05$).

تعداد سنبله در مترمربع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح قارچ مایکوریزا و اثر متقابل قارچ مایکوریزا × کود اوره در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل کود اوره × محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد بر تعداد سنبله بارور در مترمربع معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های ترکیبات تیماری قارچ مایکوریزا و کود اوره نشان داد که تیمارهای تلقیح بذر با ۲ و ۶ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار، با افزایش سطح کود اوره از صفر (شاهد) به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، بیشترین افزایش را در تعداد سنبله بارور داشتند. بیشترین تعداد سنبله در این ترکیبات با کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد، درحالی‌که کمترین تعداد سنبله در ترکیب همان سطوح قارچ با عدم مصرف اوره (شاهد) ثبت گردید (جدول ۴). این روند نشان می‌دهد که قارچ مایکوریزا و اوره به‌صورت مکمل یکدیگر عمل کرده و از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای و گسترش سیستم ریشه‌ای، پنجه‌زایی و در نتیجه تشکیل سنبله بارور را تقویت می‌کنند. همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین ، بیشترین تعداد سنبله بارور در تیمار محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل شروع گل‌دهی و پر شدن دانه به‌دنبال کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد که به‌ترتیب با میانگین‌های ۵۴۲/۳۳، ۵۷۹/۸۹ و ۵۶۹/۱۱ سنبله در مترمربع همراه بود (جدول ۶). این افزایش می‌تواند ناشی از تأثیر سایتوکینین بر تحریک تقسیم سلولی در مراکز پنجه‌زایی و کاهش سقط پنجه‌های جوان در مراحل حساس زایشی باشد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد توأم قارچ‌های مایکوریزایی و نیتروژن بهینه، با افزایش جذب فسفر و بهبود عملکرد فتوسنتزی در مرحله رویشی، پنجه‌زایی مؤثر را تقویت کرده و در نهایت منجر به افزایش تعداد سنبله بارور می‌شود (Beslemes et al., 2023). همچنین محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل قبل از گل‌دهی، با تعدیل مسیرهای تنظیمی رشد و جلوگیری از پیری زودرس، به حفظ بنیه گیاه و افزایش تولید پنجه‌های بارور کمک می‌کند (McIntyre et al., 2021).

تعداد دانه در سنبله

تعداد دانه در سنبله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های عملکرد دانه، تحت تأثیر عوامل متعدد فیزیولوژیکی، تغذیه‌ای و محیطی قرار دارد. طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تعداد دانه در سنبله تحت تأثیر تیمارهای قارچ مایکوریزا، کود اوره و محلول‌پاشی سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد که تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار منجر به افزایش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله نسبت به سایر تیمارها شد. این افزایش می‌تواند ناشی از بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش تأمین انرژی برای فرآیندهای باروری و تقسیم سلولی در دوره گل‌دهی باشد. همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی با سایتوکینین در مقایسه با شاهد (عدم محلول‌پاشی)، اثر مثبت و معنی‌داری بر افزایش تعداد دانه در سنبله داشت (جدول ۴). این یافته‌ها با اثرات شناخته‌شده‌ی سایتوکینین در کند کردن پیری، کاهش سقط گلچه‌ها و افزایش باروری، مطابقت دارد. سازوکارهای زیستی افزایش تعداد دانه می‌تواند شامل تقویت فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیتروژن (مانند نیتروژناز) در ریشه‌های تلقیح‌شده، افزایش دسترسی به

نیتروژن و در نتیجه بهبود باروری گلچه‌ها باشد (Fox et al., 2016). همچنین مطالعات نشان داده‌اند که تلقیح بذر با قارچ‌های مایکوریزایی در شرایط تنش‌های غیرزنده (مانند کم‌آبی) نیز قادر به حفظ تعداد دانه در سنبله از طریق کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود تعادل هورمونی است (Nie et al., 2024). تأثیر مثبت کاربرد خارجی سایتوکینین در مراحل شروع پر شدن دانه و ۱۴ روز پس از گل‌دهی، احتمالاً ناشی از تحریک تقسیم سلولی در مریستم‌های زایشی، افزایش تمایز سنبلچه و کاهش سقط گلچه‌های جوان است (Yang et al., 2016).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی عملکرد دانه، بازتابی از ظرفیت مخزنی دانه و کارآیی انتقال فتوآسیمیلات در طول فرآیند پر شدن دانه است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا و اثر متقابل کود اوره × محلول‌پاشی با سایتوکینین بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بهبود وزن دانه در این تیمار می‌تواند ناشی از تقویت شبکه مایکوریزایی، افزایش جذب فسفر و نیتروژن و در نتیجه بهبود کارآیی پر شدن دانه باشد (Ullah et al., 2025). همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین ، بیشترین وزن هزار دانه (۵۱/۲۲ گرم) در تیمار ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار آن (۴۶/۸۶ گرم) در شاهد (عدم مصرف اوره و سایتوکینین) ثبت گردید (جدول ۶).

جدول ۵- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری سطوح قارچ مایکوروت و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر صفات گندم

Table 5- Comparison of average treatment combinations of mycorrhizal fungi and cytokinin foliar sprays on wheat traits

قارچ مایکوریزا Mycorrhiza fungi ((kg.100 kg^{-1} of seeds	سایتوکنین Cytokinin	طول برگ پرچم Flag leaf length (mm)	طول سنبله Spike length (cm)	عملکرد دانه Grain yield (g.m^{-2})	شاخص برداشت Harvest index (%)
2	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	18.77c*	7.68d	936.7e	43.66cd
	گل‌دهی Flowering	19.53bc	7.82cd	941.2de	40.15d
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	19.20bc	8.23abc	1028.7cd	46.20c
4	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	20.68ab	7.97bcd	1140.3ab	59.37a
	گل‌دهی Flowering	21.68a	8.66a	1227.8a	51.80b
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	19.64bc	8.27ab	1196.3a	46.26c
6	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	19.33bc	8.21bc	919.7e	51.53cd
	گل‌دهی Flowering	21.33a	8.16bc	1088bc	42.76cd
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	18.70c	7.95bcd	1005.2cde	39.16d

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level ($p < 0.05$).

جدول ٦- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری سطوح کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین بر صفات گندم

Table 6- Comparison of average treatment combinations of urea fertilizer levels and cytokinin foliar spray on wheat traits

اوره Urea (kg.ha^{-1})	سایتوکنین Cytokinin	طول سنبله Spike length (cm)	تعداد سنبله Number of spikes	عملکرد دانه Grain yield (g.m^{-2})	وزن هزار دانه Thousand-grain weight (g)	شاخص برداشت Harvest index (%)
0	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	7.71^{de*}	500.44^{b}	870.3^{e}	47.77^{c}	47.14^{abc}
	گل‌دهی Flowering	7.57^{e}	5452.33^{ab}	935.7^{de}	49.66^{ab}	39.34^{d}
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	7.89^{cde}	521.11^{ab}	1014.8^{cd}	49.66^{ab}	44.93^{c}
50	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	8.04^{bcd}	489.89^{b}	1003.3^{cd}	51.22^{a}	45.70^{bc}
	گل‌دهی Flowering	8.40^{ab}	579.89^{a}	1205^{a}	49.77^{ab}	50.68^{ab}
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	8.40^{ab}	533.44^{ab}	1083.6^{bc}	49^{bc}	44.76^{c}
100	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	8.08^{bcd}	496.33^{b}	1075.9^{bc}	50.33^{ab}	51.72^{a}
	گل‌دهی Flowering	8.67^{a}	569.33^{ab}	1179^{a}	49.11^{bc}	44.69^{c}
	مرحله پر شدن دانه Seed filling stage	8.16^{bc}	517.89^{ab}	1116.3^{ab}	49.22^{bc}	41.93^{cd}

* حروف مختلف در هر ستون نشانه اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

* Means within each column followed by different letters are significantly different at the 5% probability level ($P < 0.05$).

جالب توجه این است که محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله پر شدن دانه در تمام سطوح اوره (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) منجر به افزایش وزن هزار دانه شد که به‌ترتیب به مقادیر ۴۶/۸۶، ۴۹/۳۷ و ۴۷/۷۲ گرم رسید. این روند نشان می‌دهد که سایتوکینین حتی در شرایط کمبود اوره نیز قادر به بهبود پر شدن دانه است.

سازوکار افزایش وزن دانه توسط سایتوکینین عمدتاً از طریق تحریک تقسیم سلولی در آندوسپرم و افزایش تعداد سلول‌های ذخیره‌ای دانه است. مطالعات مولکولی نشان داده‌اند که سایتوکینین‌ها با فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با چرخه سلولی در مرحله اولیه پر شدن دانه، حجم سلولی و در نهایت وزن دانه را افزایش می‌دهند (Alzaayid & Aloush, 2021). همچنین کاربرد اوره بهینه (به‌ویژه در سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار) با افزایش سطح برگ، طولانی‌تر کردن دوره فتوسنتز و بهبود انتقال مجدد مواد آسیمیلات، به افزایش تجمع ماده خشک در دانه کمک می‌کند (Li et al., 2025). این یافته‌ها با مطالعات اخیر نیز هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند کاربرد توأم کودهای بیولوژیک و تنظیم‌کننده‌های رشد مانند سایتوکینین، با تعدیل مسیرهای متابولیک و تنظیم‌کننده رشد، ظرفیت مخزنی دانه را بهبود بخشیده و منجر به افزایش وزن هزار دانه می‌شود (Ullah et al., 2025).

عملکرد بیولوژیک

عملکرد بیولوژیک که شامل مجموع ماده خشک تولیدشده در اندام‌های هوایی گیاه در واحد سطح است، شاخصی از کارآیی کلی فتوسنتز و رشد زیست‌توده در طول فصل رشد محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا، کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین و همچنین اثر متقابل قارچ مایکوریزا × کود اوره در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه به‌ترتیب با میانگین ۲۴۴۴/۹۹ و ۲۴۳۰/۳ گرم در مترمربع، عملکرد بیولوژیک را نسبت به شاهد (بدون محلول‌پاشی) به‌ترتیب ۱۴/۶۷ و ۱۳/۹۹ درصد افزایش داد. این افزایش می‌تواند ناشی از تأخیر در پیری برگ، حفظ فعالیت فتوسنتزی و افزایش تقسیم سلولی در بافت‌های رویشی باشد (جدول ۴).

این نتایج بیانگر هم‌افزایی بین قارچ مایکوریزا و اوره در افزایش رشد زیست‌توده است. قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی از طریق دو سازوکار اصلی بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند: اولاً، ریسه‌های داخل‌ریشه‌ای آن‌ها با تعدیل توازن تنظیم‌کننده رشد (کاهش سطح اسیدآبسیزیک و افزایش سایتوکینین) باعث بهبود جذب آب و مواد معدنی و افزایش گسترش سیستم ریشه می‌شوند. ثانیاً، ریسه‌های خارج‌ریشه‌ای با ترشح اسیدهای آلی (مانند اسیدمالیک)، فسفر غیرقابل دسترس را فعال کرده و جذب آن را افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به تجمع بیشتر ماده خشک می‌شود (Wahab et al., 2023). همچنین مایکوریزا با تحریک تولید ایندول ۳-استیک اسید و سایر فیتوهورمون‌ها در ریزوسفر، رشد رویشی و شاخساره را تقویت می‌کند (Ibiang et al., 2017). از سوی دیگر، افزایش کود نیتروژن تا سطح بهینه، با افزایش سطح برگ، طول ساقه و تعداد پنجه‌های بارور باقی‌مانده تا رسیدگی، به‌طور معنی‌داری عملکرد بیولوژیک را افزایش می‌دهد (Hafiza et al., 2025). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که تلفیق تلقیح بذر با ریزجانداران مفید و کاربرد خارجی سایتوکینین، از طریق هم‌افزایی در مسیرهای تنظیم رشد، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را در گندم بهبود می‌بخشد (Li et al., 2025).

عملکرد دانه

عملکرد دانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص اقتصادی در گندم، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیولوژیکی، تغذیه‌ای و تنظیم‌کننده‌های رشد قرار دارد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا و کود اوره در سطح احتمال یک درصد، اثر اصلی محلول‌پاشی با سایتوکینین در سطح پنج درصد و اثر متقابل قارچ مایکوریزا × سایتوکینین و کود اوره × سایتوکینین در سطح یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). این یافته‌ها بیانگر نقش تعاملی عوامل زیستی، تغذیه‌ای و تنظیم‌کنندگان رشد در بهینه‌سازی تولید دانه است. مقایسه میانگین‌های ترکیبات تیماری قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل حساس زایشی، بیشترین عملکرد دانه را با میانگین ۱۱۴۰/۳، ۱۲۲۷/۸ و ۱۱۹۶/۳ گرم در مترمربع تولید کرد. در مقابل، کمترین عملکرد دانه در تیمارهای تلقیح با ۴ و ۶ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین (شاهد) با میانگین ۹۳۶/۷ و ۹۱۹/۷ گرم در مترمربع مشاهده شد (جدول ۵). این تفاوت برجسته، اهمیت زمان‌بندی و ترکیب کاربرد سایتوکینین را در بهبود انتقال فتوآسیمیلات به دانه برجسته می‌کند. همچنین در برهم‌کنش کود اوره و محلول‌پاشی با سایتوکینین ، بیشترین عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار همراه با محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله گل‌دهی با میانگین ۱۲۰۵/۸ و ۱۱۷۹/۳ گرم در مترمربع به دست آمد (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که سطوح متوسط اوره (۵۰ کیلوگرم در هکتار) در ترکیب با سایتوکینین، از نظر بهره‌وری تولید، کارآمدتر از سطوح بالاتر اوره است.

قارچ‌های مایکوریزای اندوفیتی با گسترش شبکه ریسه‌های خارج‌ریشه‌ای، حجم قابل توجهی از خاک را تحت پوشش قرار داده و دسترسی گیاه به عناصر غذایی و آب را افزایش می‌دهند. این سازوکار در شرایط کمبود حاصلخیزی خاک یا تنش‌های غیرزنده (مانند خشکی)، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد دانه دارد (Nie et al., 2024). همچنین کاربرد توأم کود شیمیایی و ریزجانداران مفید (مانند مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد) با بهبود کارآیی مصرف نیتروژن و فسفر منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و اقتصادی در محصولات زراعی از جمله گندم و ذرت (*Zea mays*) می‌شود (Sobhani et al., 2022). نیتروژن به‌عنوان یک عنصر کلیدی، علاوه‌بر نقش مستقیم در سنتز پروتئین و کلروفیل، با تعدیل متابولیسم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو، به حفظ سلامت فتوسنتزی گیاه کمک می‌کند (Ahanger et al., 2021). کاربرد خارجی مهارکننده‌های اکسیداز/دهیدروژناز سایتوکینین در گندم زمستانه و جو بهاره (*Hordeum vulgare*)، عملکرد دانه را به‌میزان ۴-۶/۶ درصد و۰/۷-۶/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Nisler et al., 2021). علاوه‌بر این، محرک‌های زیستی حاوی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، عملکرد دانه جو بهاره را در شرایط مزرعه واقعی به‌طور متوسط (از ۲ درصد تا ۲/۶ درصد نسبت به شاهد) افزایش دادند (Szczepanek et al., 2018).

شاخص برداشت

شاخص برداشت، نسبت عملکرد دانه به کل زیست‌توده هوایی تولیدشده است و شاخصی از کارآیی تخصیص مواد فتوسنتزی به بخش اقتصادی گیاه (دانه) محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین و

اثر متقابل قارچ مایکوریزا × سایتوکینین و کود اوره × سایتوکینین در سطح احتمال یک درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که تخصیص مجدد مواد فتوسنتزی تحت تأثیر قوی تنظیم‌کننده‌های رشد و وضعیت تغذیه‌ای قرار دارد. مقایسه میانگین‌های ترکیبات تیماری قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی با سایتوکینین نشان داد که تیمار تلقیح با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین ، بیشترین شاخص برداشت را با میانگین ۵۹/۳۷ درصد داشت. در مقابل، تیمار تلقیح با ۲ کیلوگرم قارچ همراه با محلول‌پاشی در مرحله پر شدن دانه، کمترین شاخص برداشت (۴۰/۱۵٪) را نشان داد (جدول ۵). این یافته جالب توجه است و نشان می‌دهد که در برخی از ترکیبات، محلول‌پاشی با سایتوکینین ممکن است با تحریک رشد رویشی اضافی (ساقه و برگ)، تخصیص مواد به دانه را مختل کند. همچنین در برهم‌کنش کود اوره و سایتوکینین، بیشترین شاخص برداشت (۵۱/۷۲ درصد) در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم اوره بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار (۳۹/۳۴ درصد) در شاهد اوره (صفر کیلوگرم) همراه با محلول‌پاشی در مرحله پر شدن دانه ثبت گردید (جدول ۶). این نتایج بیانگر آن است که کاربرد سایتوکینین بدون تأمین کافی اوره ممکن است منجر به عدم تعادل در تخصیص منابع و کاهش شاخص برداشت شود. به نظر می‌رسد که در ترکیبات تیماری تلقیح با مایکوریزا و اوره مناسب، نیاز به محلول‌پاشی با سایتوکینین برای بهبود شاخص برداشت کاهش یابد، زیرا این ترکیبات به‌طور طبیعی ظرفیت انتقال مواد به دانه را افزایش می‌دهند. بااین‌حال، سایتوکینین به‌عنوان یک تنظیم‌کننده کلیدی، با افزایش قدرت مخزن، سرعت انتقال قند و بیان ژن‌های انتقال‌دهنده، می‌تواند در شرایط خاص (مانند تنش یا کمبود تغذیه) به بهبود تخصیص مواد کمک کند (McIntyre et al., 2021). افزایش شاخص برداشت در تیمارهای برتر بیانگر کارآیی بالاتر در تبدیل زیست‌توده به محصول اقتصادی و در نتیجه افزایش سودآوری برای کشاورز است. در این پژوهش، تیمار تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار بدون محلول‌پاشی با سایتوکینین ، ضمن دستیابی به بیشترین شاخص برداشت (۵۹/۳۷ درصد)، عملکرد دانه بالاتری را با حداقل نهاده‌های پرهزینه نشان داد. با فرض قیمت متوسط گندم ۲۰،۰۰۰ تومان به‌ازای هر کیلوگرم و افزایش عملکرد حدود ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به شاهد، درآمد ناخالص کشاورز حدود شش میلیون تومان در هکتار افزایش یافت. این در حالی است که هزینه تلقیح مایکوریزا به‌طور متوسط کمتر از ۱/۵ میلیون تومان در هکتار برآورد می‌شود و عدم نیاز به محلول‌پاشی با سایتوکینین موجب کاهش هزینه‌های مصرفی برای تهیه تنظیم کنندگان رشد، سم‌پاشی و عملیات زراعی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح بذر با قارچ مایکوریزا (به‌ویژه در سطح ۴ کیلوگرم در هکتار)، کاربرد بهینه کود اوره (۵۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و محلول‌پاشی با سایتوکینین در مراحل حساس زایشی (گل‌دهی و شروع پر شدن دانه) به‌صورت تکی و به‌ویژه در ترکیب، اثر مثبت و معنی‌داری بر بهبود صفات زراعی، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت گندم داشتند. این تیمارها از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش فتوسنتز، تأخیر در پیری، تقویت تقسیم سلولی و بهینه‌سازی تخصیص مواد فتوسنتزی منجر به افزایش عملکرد دانه شدند. برای دستیابی به عملکرد بالا و پایدار در گندم، توصیه می‌شود از ترکیب تلقیح بذر با ۴ کیلوگرم قارچ مایکوریزا در هکتار، مصرف ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار و محلول‌پاشی با سایتوکینین در مرحله گل‌دهی به‌عنوان یک برنامه تلفیقی مدیریت زراعی بهره‌گیری شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و حمایت‌های مسئولین دانشکده کشاورزی و کارشناسان آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد که در مراحل مختلف اجرای این پژوهش نهایت همکاری را مبذول داشتند، صمیمانه قدردانی نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

1. Ahanger, M.A., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N., Wijaya, L., & Ahmad, P. (2021). Role of nitrogen in plant growth and physiological responses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(1), 286-288.
2. Akhtar, M.S. (2019). Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solution. Volume 1. Springer Nature Singapore Pte Ltd. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8801-9
3. Alori, E.T., Dare, M.O., & Babalola, O.O. (2017). Microbial inoculants for soil quality and plant fitness. In E. Lichtfouse (Ed.), Sustainable Agriculture Review. pp. 181-308. Springer.
4. Alzaayid, D.T.J., & Aloush, R.H. (2021). Effect of cytokinin levels on some varieties of wheat on yield, growth and yield components. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science, 910*(1), 012090. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1088/1755-1315/910/1/012090
5. Anonymous. (2019). Agricultural Statistics Yearbook: Field Crops (Vol. 1). Tehran: Ministry of Agriculture Jihad, Iran.
6. Beslemes, D., Tigka, E., Roussis, I., Kakabouki, I., Mavroeidis, A., & Vlachostergios, D. (2023). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen and phosphorus uptake efficiency and crop productivity of two-rowed barley under different crop production systems. *Plants, 12*(9), 1908. https://doi.org/10.3390/plants12091908
7. Cosme, M., & Wurst, S. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi, rhizobacteria, soil phosphorus and plant cytokinin deficiency change the root morphology, yield and quality of tobacco. *Soil Biology and Biochemistry, 57*, 436443. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.024
8. Fahramand, M., Adibian, M., Sobhkhizi, M., Noori, M., Moradi, A., & Rigi, K. (2014). Effect of arbuscular mycorrhiza fungi in agronomy. *Journal of Novel Applied Sciences, 3*(4), 400-404. (In Persian with English abstract).
9. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H.M. (2019). Drought stress in plants: An overview. In: Plant Responses to Drought Stress. pp. 1-33. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). FAOSTAT: Production: Crops. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC
11. Fox, A.R., Soto, G., Valverde, C., Russo, D., Lagares, A., J.R., Zorreguieta, Á., Alleva, K., Pascuan, C., Frare, R., Mercado-Blanco, J., Dixon, R., & Ayub, N.D. (2016). Major cereal crops benefit from biological nitrogen fixation when inoculated with the nitrogen-fixing bacterium Pseudomonas protegens Pf-5 X940. *Environmental Microbiology, 18*(10), 3522-3534. https://doi.org/10.1111/1462-2920.13376
12. Ha, S., Vankova, R., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., & Tran, L.S.P. (2012). Cytokinins: Metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses. *Trends in Plant Science*, *17*(3), 172-179. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.01.005
13. Hafiza, B.S., Ishaque, W., Akhtar, M., Shani, M.Y., Azmat, M., Bauerle, W.L., Rahimi, M., & Ashraf, M.Y. (2025). Optimizing nitrogen management for sustainable wheat production in semi-arid subtropical environments: Impact on growth, physio-biochemical, and yield attributes. *Nitrogen,* *6*(2), 36. https://doi.org/10.3390/nitrogen6020036
14. Han, A.Q., Chen, S.B., Zhang, D.D., Liu, J., Zhang, M.C., Wang, B., Xiao, Y., Liu, H.T., Guo, T.C., Kang, G.Z., & Li, G.Z. (2025). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nutrient uptake in wheat under low potassium stress. *Plants, 14*(9), 1288. https://doi.org/10.3390/plants14091288
15. Ibiang, Y.B., Mitsumoto, H., & Sakamoto, K. (2017). Bradyrhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi modulate manganese, iron, phosphorus, and polyphenols in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under excess zinc. *Environmental and Experimental Botany, 137*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.011
16. Koprna, R., Humplík, J.F., Špíšek, Z., Bryksová, M., Zatloukal, M., Mik, V., Novák, O., Nisler, J., & Doležal, K. (2021). Improvement of tillering and grain yield by application of cytokinin derivatives in wheat and barley. *Agronomy, 11*(1), 67. https://doi.org/10.3390/agronomy11010067
17. Li, C., Shi, Y., Yu, Z., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2025). Optimizing nitrogen application strategies can improve grain yield by increasing dry matter translocation, promoting grain filling, and improving harvest indices. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1565446. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565446
18. Mahfouzi, S.A., Akbari, M., Chichi, A., Sanjari, M.S., Abedi Oskooi, G., Aminzadeh, A., & Rezaei, M. (2009). Pishgam, new wheat cultivar of bread for cultivation in end season normal and low irrigation in cold climate.

Journal of Breeding Seedlings and Seed, *25*(3), 513-516. (In Persian with English abstract).

19. McIntyre, K.E., Bush, D.R., & Argueso, C.T. (2021). Cytokinin regulation of source-sink relationships in plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 677585. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.677585
20. Nabizadeh, E. (2023). Effect of nitrogen fertilizer, inoculation with mycorrhizal fungus and foliar spraying of cytokinin on yield and yield components of wheat Sardari cultivar under rainfed conditions. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, *10*(3), 65-79. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22124/jms.2023.7675
21. Nie, W., He, Q., Guo, H., Zhang, W., Ma, L., Li, J., & Wen, D. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi: Boosting crop resilience to environmental stresses. *Microorganisms*, *12*(12), 2448. https://doi.org/10.3390/microorganisms12122448
22. Nisler, J., Kopečný, D., Pěkná, Z., Končitíková, R., Koprna, R., Murvanidze, N., Werbrouck, S.P.O., Havlíček, L., De Diego, N., Kopečná, M., Wimmer, Z., Briozzo, P., Moréra, S., Zalabák, D., Spíchal, L., & Strnad, M. (2021). Diphenylurea-derived cytokinin oxidase/dehydrogenase inhibitors for biotechnology and agriculture. *Journal of Experimental Botany*, *72*(2), 355-370. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa437
23. Sobhani, S.M.A., Alavifazel, M., Ardakani, M.R., Modhej, A., & Lak, S. (2022). Influence of mycorrhizal fungi and biochar on nitrogen use efficiency correlated with yield and yield components of wheat. *Plant Science Today*, *9*(3), 509-517. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.14719/pst.1486
24. Szczepanek, M., Jaśkiewicz, B., & Kotwica, K. (2018). Response of barley to seaweed biostimulant application. *Research for Rural Development*, *2*, 49-54. https://doi.org/10.22616/rrd.24.2018.050
25. Tang, H., Hassan, M.U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A.N., Qari, S.H., Liu, Y., & Miao, J. (2022). The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 919166. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166
26. Ullah, S., Shakir, L., Sohail, M., & Subhan, G. (2025). Integrated use of biofertilizers and zinc sulphate for enhanced growth and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Spectrum of Emerging Sciences*, *3*(8), 219-232. https://doi.org/10.5281/zenodo.1677956
27. Vejan, P., Abdullah, R., Khandiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, *21*(5), 573. https://doi.org/10.3390/molecules21050573
28. Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., & Reddy, S.P.P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, *12*(17), 3102. https://doi.org/10.3390/plants1217310 2
29. Yang, D., Li, Y., Shi, Y., Cui, Z., Luo, Y., Zheng, M., Chen, J., Li, Y., Yin, Y., & Wang, Z. (2016). Exogenous cytokinins increase grain yield of winter wheat cultivars by improving stay-green characteristics under heat stress. *Plos One*, *11*(5), e0155437. https://doi.org/10.1371/journal.pone.015543 7
30. Yeh, S.Y., Chen, H.W., Ng, C.Y., Lin, C.Y., Tseng, T.H., Li, W.H., & Ku, M.S.B. (2015). Down-regulation of cytokinin oxidase 2 expression increases tiller number and improves rice yield. *Rice*, *8*(1), 13. https://doi.org/10.1186/s12284-015-0043-8
31. Zhou, Q., Xue, J., Guo, L., Li, L., Zhang, Z., Huang, M., Cai, J., Wang, X., Zhong, Y., Dai, T., & Jiang, D. (2024). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on uptake, partitioning, and use efficiency of nitrogen in wheat. *Field Crops Research*, *306*, 109244. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109244